

УДК 551.465

О РОЛИ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ НЕФТЯНОГО РАЗЛИВА В МОРЕ

© 2018 г. С. Н. Зацепа^{1, *}, А. А. Ивченко¹, К. А. Коротенко²,
В. В. Солбаков^{1, 3}, В. В. Становой⁴

¹Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Москва, Россия

²Институт океанологии имени Ширшова П.П. РАН, Москва, Россия

³Федеральный исследовательский центр “Информатика и управление” РАН, Москва, Россия

⁴Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: zatsopa@gmail.com

Поступила в редакцию 10.06.2016 г.

После доработки 17.04.2017 г.

В работе проанализированы имеющиеся параметризации расчета дисперсии нефти в воду и предложена новая параметризация потока нефтяных капель в воду на основании серии экспериментальных работ последних лет, как в области исследований ветрового волнения, так и в области изучения дробления (диспергирования) нефтяных капель при обрушении ветровых волн. Для определения первичного потока капель нефти в воду предложено использовать скорость оборачивания поверхности моря TOR. В работе приведены расчеты параметра масштаба логнормального распределения (медианы) распределения количества капель нефти по размерам в широком диапазоне изменения ее плотности, вязкости, межфазного натяжения и скорости ветра.

DOI: 10.1134/S0030157418040135

При аварийных сбросах нефти или нефтепродуктов в морскую среду испарение легких фракций в атмосферу и диспергирование нефти в водную толщу являются основными факторами, за счет которых уменьшается количество нефти или нефтепродукта на поверхности моря.

Удаление разлива с поверхности за счет диспергирования происходит при обрушении ветровых волн, в результате которого нефть оказывается в слое волнового перемешивания, где она дробится на капли в результате воздействия турбулентных пульсаций поля скорости морской среды. Капли нефти движутся в верхнем слое моря вместе с течениями и вовлечены в процессы горизонтального и вертикального турбулентного обмена. Силы плавучести приводят к подъему капель к границе раздела океан–атмосфера и выходу на поверхность, формируя характерный удлиненный след позади дрейфующего нефтяного слика. Влияние на всплытие нефтяных капель могут оказывать пузырьки воздуха, попадающие в воду при обрушении волн. Пузырьки могут соединяться с каплями нефти и образовывать агрегаты, тем самым существенно увеличивая плавучесть капель. Однако этот сложный и стохастический процесс, надо признать, до настоящего времени недостаточно исследован и экспериментально, и

теоретически. Частично капли нефти проникают в более глубокие слои моря, где рассеиваются в водной толще как пассивная неконсервативная примесь.

Этот процесс обычно называют естественным диспергированием (natural dispersion) в отличие от разрушения пленки нефти на поверхности моря в условиях применения специальных химических реагентов (chemical dispersion). В данной работе рассматривается процесс естественного диспергирования, который во многом обусловлен обрушением волн и турбулентным обменом в слое волнового перемешивания и в нижележащих слоях воды. Отметим лишь то, что применение диспергентов изменяет свойства нефти (в большей степени – поверхностное натяжение, в меньшей – вязкость) таким образом, чтобы процессы диспергирования протекали с большей интенсивностью.

В работах [18, 7], в свое время соответствовавших степени изученности феномена диспергирования нефтяной пленки волнами, приведены параметризации зависимости от скорости ветра и настроечные коэффициенты с недостаточной обоснованностью их выбора. В модели [7] диспергирование полностью определяется скоростью ветра и не зависит от свойств нефти. В рабо-

те [18] поток Q_{Mc+} нефти в воду описывался соотношением

$$Q_{Mc+} = K_A(W_{10} + 1)^2 \left(1 + K_B h_{oil} \mu_{oil}^{1/2} \sigma_{ow}\right)^{-1}, \quad (1)$$

где W_{10} – скорость ветра на высоте 10 м от поверхности воды, μ_{oil} , σ_{ow} – вязкость нефти и межфазное натяжение на границе раздела нефть–вода, h_{oil} – толщина слоя нефти на поверхности, коэффициенты K_A и K_B должны быть определены экспериментальным путем. Основные закономерности проникновения нефти в воду соотношением (1) описывает верно. Чем сильнее ветер, тем выше волны и, после порогового значения примерно 5 м/с, больше обрушивающихся гребней; чем больше вязкость нефти, тем труднее нефть проникает в воду; чем меньше межфазное натяжение, тем больше поток, так как мелкие капли нефти медленно возвращаются на поверхность моря. Первый из множителей в (1) соответствует доле поверхности моря, покрытой нефтью, которая подвергается воздействию; единица, добавленная к скорости ветра, описывает наличие диспергирования при отсутствии ветра, последний – доле нефти, которая не возвращается к поверхности. К недостаткам соотношения (1) следует отнести несогласованную размерность, отсутствие строгих физических обоснований при ее выводе и отсутствие такой важной характеристики, как плотность нефти.

Вплоть до последних лет наиболее распространенной была параметризация потока нефти в воду в виде ансамбля капель, предложенная после лабораторных экспериментов [12]:

$$Q_{DS} = C_{oil} D^{0.57} f_s F_{wc} d_o^{0.7} \Delta d, \quad (2)$$

где Q_{DS} – поток нефти в воду ($[Q_{DS}] = \text{кг}/\text{м}^2/\text{с}$) за счет проникновения капель с размерами в интервале от $d_o - 1/2 \Delta d$ до $d_o + 1/2 \Delta d$; f_s – часть поверхности моря, покрытая нефтью; d_o – средний диаметр капель нефти в соответствующем интервале; C_{oil} – параметр, зависящий от вязкости нефти; D – диссипация энергии обрушивающихся волн на единицу площади в одиночном обрушении. В работе приняты следующие соотношения для сомножителей в (2):

$$D = 0.0034 \rho_w g H_{rms}^2, \quad (3)$$

$$H_{rms} = H_{wave} / \sqrt{2}, \quad (4)$$

¹ Здесь и далее в обозначении потоков добавлен нижний индекс, который соответствует фамилиям авторов работ, где приведена параметризация: [18] – Mc+, [12] – DS, эта работа – Z+.

где H_{wave} – высота волны, ρ_w – плотность воды, F_{wc} – часть поверхности моря, покрытая “барашками” (whitecaps) в единицу времени:

$$F_{wc} = 0.032 (W_{10} - W_s) / T_{wave}, \quad (5)$$

где W_s – скорость ветра, при которой начинается образование “барашков” (~5 м/с), T_{wave} – средний период волн.

В работах [12, 11] были проведены первые исследования разрушения пленки нефти на ансамбль капель различного размера при турбулентном движении в водной толще после обрушения волны. Было установлено, что образующиеся при дроблении капли подчиняются степенному закону распределения, так что количество капель в диапазоне от $d - \Delta d/2$ до $d + \Delta d/2$ определяется степенной зависимостью:

$$N(d) \propto d^{-2.3}. \quad (6)$$

К недостаткам предложенной параметризации (2) относится необходимость определения максимального размера капель в ансамбле, отсутствие зависимости потока нефти от характеристик нефти на поверхности моря, а также отсутствие понятной физической модели процесса.

Рассмотрим далее современные подходы к оценке потока нефти в воду благодаря обрушению волн и последующее диспергирование пленки нефти на капли различного размера.

ОБРУШЕНИЕ ВОЛН

Обрушение поверхностных ветровых волн приводит к тому, что нефть, находящаяся на поверхности моря и оказавшаяся в области обрушения, оказывается в водной толще. В работе [19] было введено понятие скорости оборачивания поверхности моря (turnover rate (TOR)) и предложено соотношение для его оценки:

$$\text{TOR} = \int c \Lambda(c) dc \approx K_{\text{TOR}} u_*^3 g c_T^{-4}, \quad (7)$$

где $L = \int \Lambda(c) dc$ – общая длина фронтов обрушивающихся волн на единицу площади моря, $\Lambda(c) dc$ – длина обрушивающихся фронтов волн, движущихся с фазовой скоростью от c до $c + dc$, c_T – пороговая фазовая скорость волн, при которой начинается обрушение, u_* – динамическая скорость в приводном слое атмосферы, коэффициент $K_{\text{TOR}} \approx 1.4 \times 10^{-2}$.

Приняв, что вся нефть на поверхности моря, подвергающаяся воздействию обрушающихся волн, оказывается под поверхностью моря, поток

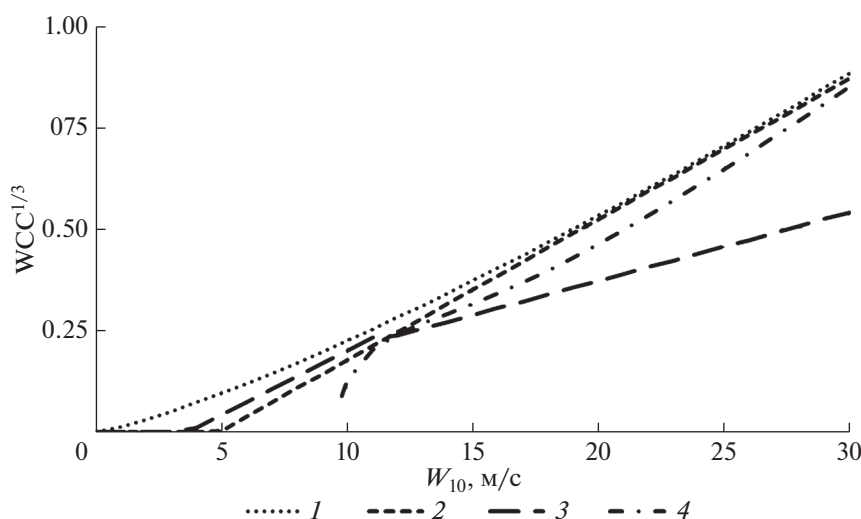


Рис. 1. Сравнение параметризации WCC, полученных различными авторами. Номера кривых 1, 2, 3, 4 соответствуют результатам оценок WCC, приведенных в [2, 10, 21, 22], соответственно.

нефти с единицы поверхности моря в единицу времени может быть записан в виде

$$\tilde{Q}_{\text{disp}} = M_{\text{oil}} \text{TOR} = \rho_{\text{oil}} h_{\text{oil}} \text{TOR}, \quad (8)$$

где M_{oil} , ρ_{oil} и h_{oil} — масса, плотность и толщина пленки нефти на поверхности моря. Принципиальным отличием от параметризаций (1) и (2) здесь является связь между количеством/толщиной нефти на поверхности моря и величиной потока; ранее аналогичная формулировка была использована в работах [6, 14, 23]. Естественно предположить, что в воду может попасть лишь часть нефтяного разлива, подвергаясь разрушению волнами, в то время как в параметризации (2) такая связь отсутствует. Тильда в нотации потока нефти в воду использована с целью подчеркнуть промежуточный характер оценки потока, так как часть нефти вернется на поверхность за счет положительной плавучести капель.

Для проверки соотношения (7) в [19] предложено сравнить его с результатами экспериментальных исследований по оценке площади моря, покрытой барашками и пеной (WCC — white cap coverage), так как последняя определяется зависимостью [19]:

$$\text{WCC} = \int c T_f \Lambda(c) dc, \quad (9)$$

где T_f — время “жизни” пены (пузырьков) на поверхности моря после обрушения волны. Если T_f не зависит от параметров волнения, то $\text{WCC} = T_f \text{TOR}$. В [19] для соотношения (7) не была определена пороговая фазовая скорость волн c_T , при которой начинается обрушение. В работе [2] экспериментально зафиксирована фазовая

скорость движения барашка (обрушивающегося гребня волны), примерно равная 2.5 м/с в диапазоне скоростей ветра W_{10} от 10 до 20 м/с.

Многочисленные оценки зависимости $\text{WCC}(W_{10})$, проведенные в различных регионах, показывают значительную изменчивость. К основным причинам неоднозначной зависимости WCC от скорости ветра, как правило, относят, с одной стороны, различие в стадиях развития волнения [2, 8], тенденцию скорости ветра к росту или падению, стратификацию приподнятого слоя атмосферы над морем [10], и, с другой стороны, факторы, влияющие на время существования морской пены, складывающиеся из времени подъема воздушных пузырьков к границе раздела вода–воздух и времени их жизни на поверхности [1, 2].

Результаты экспериментов показывают, что зависимость $\text{WCC}(W_{10})$ хорошо описываются кубическим законом, поделенным на два поддиапазона [10]:

$$\begin{aligned} \text{WCC}(\%) &= 3.18 \times 10^{-3} (W_{10} - 3.7)^3, \\ &3.7 \text{ м/с} < W_{10} < 11.25 \text{ м/с}, \\ \text{WCC}(\%) &= 4.82 \times 10^{-4} (W_{10} + 1.98)^3, \\ &9.25 \text{ м/с} < W_{10} < 23.1 \text{ м/с}. \end{aligned} \quad (10)$$

Эти результаты подтверждают ранее приводимые оценки площади поверхности моря, покрытой барашками и пеной (WCC), полученные при обработке данных натуральных экспериментов и представленные на рис. 1. Номера кривых 1, 2, 3, 4 соответствуют результатам оценок WCC, приведенных в [22, 21, 10, 2] соответственно.

Оценка времени оборачивания поверхности моря (час) в зависимости от скорости ветра

	Источник	Скорость ветра, м/с										
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
T_{R1} , час	[16]	1.1	0.4	0.2	0.1	0.09	0.06	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04
T_{R2} , час	[19, 2]	5.8	3.4	2.1	1.4	1.0	0.7	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2
T_{R3} , час	[10, 1]	9.0	3.5	1.8	1.0	0.7	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3

Переход от значений площади поверхности моря, покрытой барашками и пеной, к значению скорости оборачивания водной поверхности возможен, если известно время жизни пузырьков воздуха T_f , из которых состоит морская пена. По данным [1] эта величина T_f имеет тенденцию к росту при увеличении скорости ветра и значительный разброс, возможно, связанный с температурой морской воды, от которой зависит вязкость воды и, как следствие, скорость подъема газовых пузырьков к поверхности.

Оценим время, необходимое для “полного оборота” поверхности для различных скоростей ветра, пользуясь несколькими подходами. Время оборачивания поверхности моря $T_R = 1/TOR$ представляет собой масштаб времени, за которое каждый элемент поверхности хотя бы один раз разрушается при обрушении ветровых волн. Фактически, за это время, если капли мелкие, вся нефть должна уйти с поверхности естественным путем без дополнительного механического воздействия. В таблице 1 T_{R1} – скорость оборачивания поверхности при выборе в качестве масштаба

времени период волны [16], T_{R2} – рассчитана согласно соотношению в [19] с принятым значением минимальной скорости обрушающихся волн равным 2.5 м/с. T_{R3} – рассчитана по WWC согласно [10] и времени существования пены согласно построенной линейной регрессии для зависимости T_f от скорости ветра (см. рис. 2 в [1]). На рис. 2 представлена аппроксимация данных наблюдений по времени жизни пены [1]. Цифрами обозначены температурные диапазоны: 1 – $T_W < 3^\circ\text{C}$; 2 – $3^\circ\text{C} < T_W < 15^\circ\text{C}$; 3 – $15^\circ\text{C} < T_W$.

Следует отметить, что T_{R1} в несколько раз меньше, чем T_{R2} или T_{R3} , что, в конечном счете, должно привести к большим значениям потока нефти на диспергирование.

Отметим, что, по одному лишь параметру W_{10} , по-видимому, значение TOR может быть определено с погрешностью в десятки процентов, имея в виду и неопределенность в оценке времени существования пены на поверхности моря, и зависимость параметров волн от разгона, наличия те-

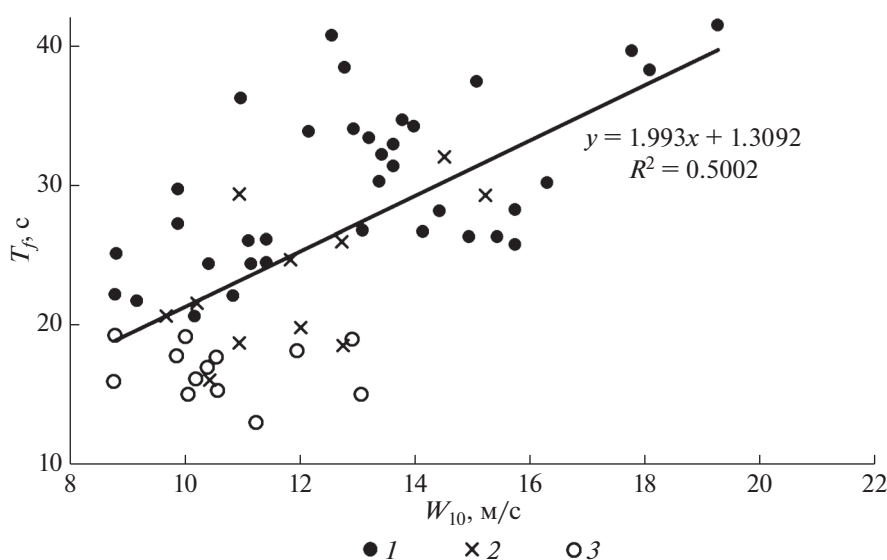


Рис. 2. Зависимость времени существования пятен пены от скорости ветра [1]. 1–3 – Температурные диапазоны (см. текст).

чений и орографических особенностей рельефа дна и берегов.

ТРАНСФОРМАЦИЯ ПЛЕНКИ НЕФТИ В КАПЛИ

В работе [3] со ссылкой на [17] указано, что в ряде экспериментов по дроблению капель в турбулентных потоках для капель с размерами, меньшими, чем максимальный устойчивый размер d_{\max} , плотность распределения числа капель по размерам описывалась степенным законом с показателем степени $s = -2.3 \dots -3$. При этом была выявлена автомодельность распределений, полученных в разнообразных экспериментах после нормирования результатов измерений на общее количество капель и на их средний (медианный) диаметр d_{50} . Этот факт может означать то, что распределение капель по размерам определяется, прежде всего, физико-химическими свойствами дробящейся фракции и слабо зависит от механизма перемешивания/дробления. Считается, что степенные зависимости плохо аппроксимируют распределения частиц в области малых размеров [3], и возможность их использования для каждой прикладной задачи следует оценить отдельно. Кроме того, степенной закон распределения капель в качестве параметра содержит максимальный размер капель, который также необходимо определять. Концепция прекращения дробления капель при достижении условий, когда силы поверхностного натяжения начинают превалировать над турбулентными напряжениями, была выдвинута в [4] и развита до расчетного соотношения в [15]:

$$d_{\max} = c(\sigma_{ow}/\rho_{oil})^{3/5} \varepsilon^{-2/5}, \quad (11)$$

где ε – скорость диссипации турбулентной энергии, σ_{ow} – межфазное натяжение. В периоды штормов, когда скорость диссипации турбулентной энергии в верхнем слое моря порядка 100 Вт/кг, акты обрушения поверхностных волн и неустойчивость дрейфовых течений будут обеспечивать постоянный поток капель с малыми размерами в слой волнового перемешивания моря. Следует отметить, что типичные уровни диссипации турбулентной энергии в верхних слоях океана (1–10 Вт/кг) могут порождать капли нефти с размерами в сотни мкм, которые относительно быстро будут подниматься к поверхности за счет сил плавучести. Для фиксированных значений плотности нефти $\rho_{oil} = 900 \text{ кг/м}^3$ и $\sigma_{ow} = 25 \text{ дин/см}$ соотношение (11) приводится к виду $d_{\max} = 0.0018\varepsilon^{-2/5}$, оценки максимального диаметра капель для характерных значений скорости диссипации турбу-

лентной энергии 100, 10 и 1 Вт/кг составляют 270, 700 и 1800 мкм, соответственно.

Анализ теоретических моделей дробления частиц и экспериментальных данных, проведенный в [3], показал, что распределение числа капель по размерам хорошо описывается логнормальным законом ($LN(\mu, \sigma^2)$) – двухпараметрическое распределение, где μ – параметр масштаба (медиана) практически во всех экспериментах, причем, наилучшее совпадение достигается при значении параметра формы (дисперсии) $\sigma = 0.72$.

В проекте SINTEF [9] исследовалось дробление капель нефти при выпуске из сопла, имитирующем выходное отверстие подводной скважины. Логнормальное распределение капель нефти сравнивалось с часто используемым распределением Розина-Раммлера (PP), являющегося частным случаем распределения Вейбулла [5]. Было установлено, что распределение капель нефти, обработанной диспергентом, лучше подчиняется логнормальному закону, а для необработанной нефти больше подходит распределение PP или логнормальное распределение с верхним пределом.

Кривая 1 на рис. 3 соответствует определенному в эксперименте [20] распределению количества частиц диспергированной нефти по размерам и аппроксимируется логарифмически нормальным законом. В предположении сферичности капель нефти, распределение объема нефти по размерам капель представляет третий момент исходного логнормального распределения количества капель нефти по размерам и, в соответствии с [13], медиана этого распределения определяется соотношением

$$\ln(d_{50}^V) = \ln(d_{50}^N) + 3\sigma^2, \quad (12)$$

где d_{50}^V – медиана распределения объема нефти по размерам капель, d_{50}^N – медиана распределения количества капель нефти по размерам, σ – параметр логнормального распределения капель.

В экспериментах [20] распределение объема нефти по размерам капель оказалось отличным от теоретического логнормального закона (кривая 2), но хорошо аппроксимировалось логнормальным распределением с верхним пределом, значение которого задавалось равным максимальному размеру капли нефти в эксперименте (кривая 3). На рис. 3 (кривая 4) приведена логнормальная функция распределения с верхним пределом d_{UL} , определенном по правилу “медиана плюс три сигма” ($\ln(d_{UL}) = \ln(d_{50}^N) + 3\sigma$). Здесь отметим тот факт, что как для $\ln(d)$, распределенного по нормальному закону со средним $\ln(d_{50})$, значение функции распределения $F_N(\bar{x} + 3\sigma) \approx 0.999$, так и

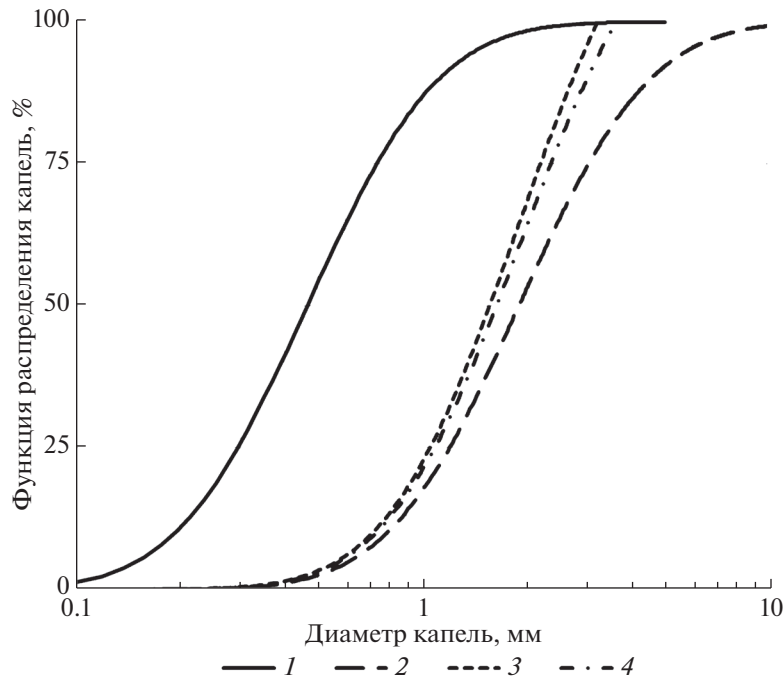


Рис. 3. Сравнение расчетного и экспериментального распределения для количества частиц и для объема нефти по размерам. 1 – Распределение количества частиц по размерам капель, 2 – распределение объема по размерам капель, 3 – логнормальное распределение с верхним пределом ($d_{\max} = 3.2$ мм), 4 – логнормальное распределение с верхним пределом ($d_{\max} = d_{50}^N e^{3S_e}$).

для функции логнормального распределения $F_{LN}(d_{50} e^{3S_e}) \approx 0.999$, что соответствует малому количеству капель большего размера. Из рисунка видно, что кривые 3 и 4 близки и, таким образом, практическое определение максимального значения диаметра капель возможно “по правилу трех сигм” и не приводит к существенной потере точности.

Для распределения количества частиц по размерам, представленного кривой 1 (сплошной линией) на рис. 3, медиана $d_{50}^N = 0.467$ мм, а дисперсия в единицах десятичных логарифмов $S_{10} = 0.297$, в единицах натуральных логарифмов $S_e = \ln(10)S_{10}$. Определим значение максимального размера в ансамбле диспергированных капель как $d_{\max 3S}^N = d_{50}^N e^{3S} = d_{50}^N e^{3 \ln(10)S} \approx 7.7 d_{50}^N \approx 3.6$ мм, что приблизительно соответствует значению максимального размера капель, измеренного в эксперименте (~3.2 мм). Расчет по (12) дает:

$$\begin{aligned} \ln(d_{50}^V) &= \ln(d_{50}^N) + 3(\ln 10 S_{10})^2 = \\ &= \ln(d_{50}^N) + 3(2.3 \times 0.297)^2 = \ln(d_{50}^N) + 1.40 \end{aligned} \quad (13)$$

или $d_{50}^V = e^{1.40} d_{50}^N \approx 4.04 d_{50}^N = 0.467 \times 4.04 = 1.87$ мм, что соответствует результату, приведенному для теоретического распределения (кривая 2) на рис. 3.

В отчетах SINTEF [9, 20] отмечено, что при выпуске нефти из подводного сопла и при обрушении волн процесс дробления можно характеризовать безразмерными числами Рейнольдса, Фруда и Вебера лишь в начальный период времени и на небольших расстояниях от выпуска или поверхности моря. По мере удаления от сопла интенсивность дробления уменьшается, и, по этой причине, выводы классической теории о дроблении капель в стационарном турбулентном потоке в исследуемых процессах нужно применять с осторожностью. Ограниченность времени процесса дробления капель приводит к появлению в ансамбле капель с размерами, большими, чем максимальный диаметр d_{\max} (11), предсказанный по теории Колмогорова [4]. С другой стороны, крупные капли нефти довольно быстро поднимаются к поверхности и верхний предел логнормального распределения d_{UL} должен уменьшаться.

На основе большого числа лабораторных экспериментов [16] было определено, что медиана распределений количества частиц нефти по размерам d_{50}^N при обрушении волн зависит от физических свойств нефти (вязкость, плотность и межфазное натяжение). Авторы ввели модифицированное число Вебера в виде

$$We^* = We / (1 + B' Vi^\alpha)^{1/\alpha}, \quad (14)$$

где “классическое” число Вебера $We = \rho_{oil} U^2 h_{oil} / \sigma_{ow}$, коэффициенты B' и α определены экспериментальным путем, $U = \sqrt{2gH_{wave}}$ – скорость падения обрушивающегося гребня волны, ρ_{oil} – плотность нефти или нефтепродукта, число вязкости $Vi = We/Re = \mu_{oil} U / \sigma_{ow}$ и число Рейнольдса $Re = \rho_{oil} U h_{oil} / \mu_{oil}$.

По результатам экспериментов в лотке и в волновом канале было установлено, что

$$d_{50}/h_{oil} = A(We^*)^{-a}, \quad (15)$$

где коэффициент $A = 2.251$.

Соотношение (15) можно преобразовать к явной зависимости медианы логнормального распределения количества капель нефти по размерам от физических характеристик нефти, толщины пленки нефти и скорости ветра. Получим

$$d_{50}^N = A \frac{h_{oil}^{0.4} \sigma_{ow}^{0.6} (1 + 0.02(\mu_{oil} W_{10} / \sigma_{ow})^{0.6})}{\rho_{oil}^{0.6} 0.57 W_{10}^{1.2}}. \quad (16)$$

Принимая, в соответствии с [3], что параметр логнормального распределения капель $\sigma \approx 0.7$, получаем максимальный размер капель, примерно в 8–10 раз превышающий значение медианы d_{50}^N .

Из (16) следует, что плотность нефти оказывает не столь заметное влияние на итоговый размер капель, как межфазное натяжение или вязкость. Учитывая, что плотность для большинства типов нефти и нефтепродуктов меняется в диапазоне от 700 до 1000 кг/м³, то ее влияние на d_{50} оказывается в пределах 23%, так как $d_{50}^N(\rho_{oil} = 700) / d_{50}^N(\rho = 1000) = (1000/700)^{0.6} = 1.23$. Поскольку вязкость нефти за счет процессов выветривания и эмульгирования изменяется значительно, в некоторых случаях увеличиваясь на два порядка и более, то ее роль в итоговых значениях размеров капель существенно выше. Аналогично, толщина нефти на поверхности моря уменьшается на несколько порядков за счет процессов растекания, деформации слика полем поверхностных течений, в результате испарения и диспергирования.

Примеры расчетов по соотношению (16) приведены на рис. 4, изолинии на диаграммах – значения d_{50}^N в микрометрах. Чтобы перейти к распределению объема нефти по размерам частиц, необходимо рассчитанные значения d_{50}^N умножить на 4.3 или 12.7 в зависимости от выбранной дисперсии (0.7 или 0.92) в соответствии с соотношением (12). Плотность воды в расчетах принята равной 1024 кг/м³.

Роль плотности нефти существенно проявляется в оценке количества нефти, возвращающегося к поверхности за время между последовательными обрушениями. Эта величина определяется скоростью подъема капель, которая зависит от их плавучести.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена новая параметризация для оценки потока нефти в водную толщу в результате естественного диспергирования нефтяного разлива, основанная на современных результатах исследований ветрового волнения и лабораторных экспериментов по дроблению нефтяной пленки на капли в достаточно широком диапазоне изменения свойств различных типов нефти и нефтепродуктов. Для определения первичного потока капель нефти в воду предложено использовать скорость оборачивания поверхности моря TOR – характеристику ветрового волнения, впервые введенную в работе [19]. Эксперименты [9, 16, 20] дают основания для оценки параметров распределения капель нефти в зависимости от физических свойств дробящейся субстанции в турбулентном слое волнового перемешивания. В работе приведены расчеты параметра масштаба логнормального распределения (медианы) распределения количества капель нефти по размерам в широком диапазоне изменения ее плотности, вязкости, межфазного натяжения и скорости ветра.

В итоге, основное соотношение для оценки потока нефти от поверхности в водную толщу может быть записано в виде

$$\frac{\partial h_{oil}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_{oil}} Q_{disp} = -h_{oil} TOR F_{up}(d_{50}^N), \quad (17)$$

где множитель $F_{up}(d_{50}^N)$ необходим для того, чтобы перейти от первичной оценки потока от поверхности к результирующему потоку, учитывающему уход капель нефти в слой волнового перемешивания и далее, в более глубокие слои моря, и возврат капель на поверхность за счет положительной плавучести. В работе предложено соотношение для оценки максимального размера капель, что позволяет рассчитать корректирующий “множитель” $F_{up}(d_{50}^N)$ в зависимости от ветровых условий и параметров распределения ансамбля диспергированных капель. Этот вопрос рассмотрен во второй части работы.

Результаты работы [16] нуждаются в дополнительной проверке в натуральных условиях, но представляют существенное продвижение для развития представлений о физической картине проникновения нефти в воду при обрушении

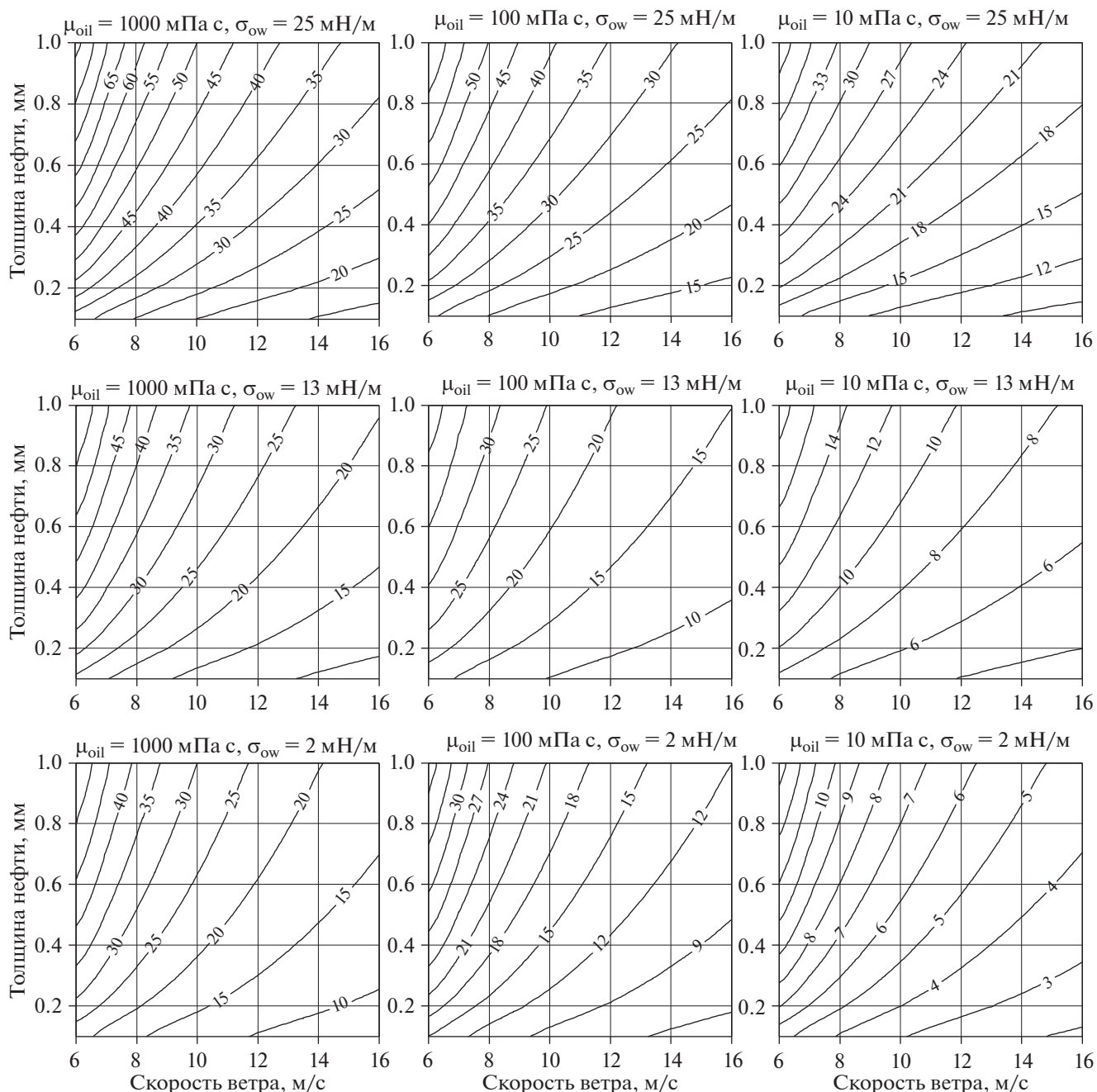


Рис. 4. Оценка медианы распределения капель диспергированной нефти по размерам (мкм) в зависимости от свойств нефти, скорости ветра и толщины пленки нефти на поверхности.

поверхностных волн. К оригинальным приемам в [16] следует отнести использование суммы безразмерных чисел (Вебера и Рейнольдса) в качестве определяющего параметра для оценки медианы распределения капель нефти; вызывает вопросы определение числа Рейнольдса, в котором в качестве пространственного масштаба процесса дробления капель используется толщина слоя нефти на поверхности. Тем не менее, впервые были получены соотношения, позволяющие свя-

зать параметры распределения капель по размерам с вязкостью, плотностью и межфазным натяжением нефтей. Последнее представляется особенно важным, так как дает основания для параметризации процесса химического диспергирования нефти.

Исследования морского ветрового волнения показывают, что однопараметрическая зависимость скорости оборачивания поверхности моря вряд ли может претендовать на достаточную точ-

ность. По-видимому, дальнейший прогресс в описании процесса диспергирования нефти в морской среде возможен с использованием результатов современных спектральных моделей морского ветрового волнения для оценки скорости оборачивания поверхности моря с учетом значимых региональных факторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 14-07-00513, 14-07-00434 и 15-07-04871.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бортковский П.С.* Тепло- и влагообмен атмосферы и океана при шторме. Л.: Гидрометиздат, 1983. 160 с.
2. *Бортковский П.С.* Пространственно-временные характеристики барашков и пятен пены, образующихся при обрушении ветровых волн // *Метеорология и гидрология*. 1987. № 5. С. 68–75.
3. *Бровченко И.А.* Модель образования спектра нефтяных капель в приповерхностном слое океана // *Прикладна гідромеханіка*. 2004. Т. 6(78). № 2. С. 20–26
4. *Колмогоров А.Н.* О дроблении капель в турбулентном потоке // *Докл. АН СССР*. 1949. Т. 66. № 5. С. 825–828.
5. *Королев В.Ю., Соколов И. А.* Об условиях сходимости распределений экстремальных порядковых статистик к распределению Вейбулла // *Информатика и ее применение*. 2014. Т. 8. Вып. 3. С. 3–11.
6. *Овсиенко С.Н., Зацепя С.Н., Ивченко А.А.* Моделирование разливов нефти и оценка риска их воздействия на окружающую среду // *Тр. ГОИН*. 2005. Вып. 209. С. 248–271.
7. *Audunson T.* The fate and weathering of surface oil from the Bravo blowout // *Marine Environmental Research*. 1980. V. 3. № 1. P. 35–61.
8. *Babanin A.V.* Breaking of ocean surface waves // *Acta Phys. Slovaca*. 2009. V. 59. №. 4. P. 305–535.
9. *Brandvik P.J., Johansen Ø., Farooq U., et al.* Sub-surface oil releases – Experimental study of droplet distributions and different dispersant injection techniques-version 2. A scaled experimental approach using the SINTEF Tower basin // *SINTEF report No: A26122*. Trondheim, Norway 2014. ISBN: 9788214057393.
10. *Callaghan A., de Leeuw G., Cohen L., O'Dowd C.D.* Relationship of oceanic whitecap coverage to wind speed and wind history. // *Geophys. Res. Letters*. 2008. V. 35. L23609. P. 5.
11. *Delvigne G.A.L., Hulsen L.J.M.* Simplified laboratory measurements of oil dispersion coefficient – application in computations of natural dispersion. In: *Proceeding of the 17th Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar*. Vancouver, British Columbia. 1994. V. 1. P. 173–187.
12. *Delvigne G.A.L., Sweeney C.E.* Natural dispersion of oil // *Oil and Chemical Pollution*. 1988. V. 4. № 4. P. 281–310.
13. *Heintzenberg, J.* Properties of the log-normal distribution // *Aerosol. Sci. Technol.* 1994. V. 21. P. 46–48.
14. Helsinki Commission (HELCOM) An Updated Assessment of the Risk for Oil Spills in the Baltic Sea Area. // Helsinki Commission (HELCOM). 2002. Finland. <http://www.helcom.fi/stc/files/shipping/RiskforOilSpillsReport2002.pdf>.
15. *Hinze J.O.* Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes // *AICHE J.* 1955. V. 41. P. 289–295.
16. *Johansen O., Reed M., Bodsberg N.R.* Natural dispersion revisited // *Marine Pollution Bulletin*. 2015. V. 93. Issues 1–2. P. 20–26.
17. *Khelifa A., Stoffyn-Egli P., Hill P.S., Lee K.* Characteristic of Oil Droplets Stabilized by Mineral Particles: Effect of Oil Type and Temperature // *Spill Science & Technology Bulletin*. 2002. V. 8. № 1. P. 19–30.
18. *Mackay D., Buist I., Mascarenhas R., Paterson S.* Oil spill processes and models // *Environment Canada*. 1980. Report No EE-8. Ottawa. Ontario. 96 p.
19. *Phillips O.M.* Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves // *J. Fluid Mech.*, 1985. V. 156, P. 505–531.
20. *Reed M., Johansen, Ø., Leirvik F., Brors B.* Numerical Algorithm to Compute The Effects of Breaking Waves on Surface Oil Spilled at Sea. Final Report Submitted to the Coastal Response Research Center. Report F10968, SINTEF, Trondheim, Norway, 2009. 131p. <https://crrc.unh.edu/sites/crrc.unh.edu/files/final_report_sintef_natural_dispersion_october-2009.pdf>.
21. *Stramska M., Petelski T.* Observations of oceanic whitecaps in the north polar waters of the Atlantic // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2003. V. 108. № C3. doi 10.1029/2002JC001321. 10 p.
22. *Wu J.* Oceanic whitecaps and sea state // *Journal of Physical Oceanography*. 1979. V. 9. № 5. P. 1064–1068.
23. *Zatsepa S., Ivchenko A., Ovsienko S.* A local operative model for oil drift and dispersion // *Proc. on Combating Marine Oil Spills in Ice and Cold Conditions*. 1992. P. 189–192.

The Role of Wind Waves in Natural Dispersion of Oil Spill in the Sea

S. N. Zatsepa, A. A. Ivchenko, K. A. Korotenko, V. V. Solbakov, V. V. Stanovoy

In the paper, obtainable parametrizations for calculating the natural dispersion of oil spilled at the sea surface are analyzed. A new parametrization for the oil droplet flux into water is inferred from a series of recent experimental studies combining both wind wave researches and those associated with natural dispersion of oil droplets caused by wind waves overturn events. To estimate the primary flux of oil droplets into the water, the surface turnover rate (TOR) is applied. The calculations of the scale parameter of the lognormal distribution (median) of the oil droplet size distribution over a wide range variation of oil density, viscosity, interfacial tension as well as wind speed are presented.